

*На правах рукописи*

**Толстухин Иван Александрович**

**Детекторы гамма-квантов в эксперименте GlueX**

01.04.01 – «Приборы и методы экспериментальной физики»

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва – 2015

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ).

Научный руководитель: **Сомов Сергей Всеволодович**  
кандидат физико-математических наук, доцент  
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Официальные оппоненты: **Рыкалин Владимир Иванович**  
доктор физико-математических наук, профессор,  
главный научный сотрудник  
НИЦ «КИ» ФГБУ ГНЦ ИФВЭ, г. Протвино

**Головач Евгений Николаевич**  
кандидат физико-математических наук,  
старший научный сотрудник НИИЯФ МГУ, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится «30» сентября 2015 г. в 15 час. 00 мин. на заседании Диссертационного совета Д 212.130.07 на базе НИЯУ МИФИ по адресу: 115409, г. Москва, Каширское ш., дом 31, телефон (499) 324-84-98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке НИЯУ МИФИ и на сайте <http://ods.mephi.ru>.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2015 г.

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в двух экземплярах, заверенных печатью организации, по адресу НИЯУ МИФИ.

Ученый секретарь Диссертационного совета  
доктор физико-математических наук, профессор



С.Е. Улин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Эксперимент GlueX нацелен на исследование природы конфайнмента [1]. Явление конфайнмента кварков и глюонов, составляющих элементарные частицы, является базовым эффектом квантовой хромодинамики КХД. До сих пор нет количественного описания эффекта конфайнмента. Расчеты в рамках решеточной КХД предсказывают детальный спектр масс и возможные моды распадов гибридных мезонов и глюоболов. Однако для прояснения механизма конфайнмента необходимы новые экспериментальные данные о свойствах этой формы материи. В эксперименте GlueX предполагается исследовать глюонное возбуждение легкого мезона с запрещенными квантовыми числами  $J^{PC} = 1^{-+}$  и с массой до  $2.5 \text{ ГэВ}/c^2$ . В предыдущих экспериментах такие мезоны были получены в адронных взаимодействиях с использованием пионного или каонного пучков (E852, VES в ИФВЭ и NENKEI в КЕК). В эксперименте GlueX экзотические мезоны образуются в процессе фоторождения, в котором, как предсказывает ряд моделей, линейно поляризованный фотон обладает свойствами адрона, т.е. его можно представить как  $\bar{q}q$ -пару с глюонной связью, что способствует повышению вероятности создания гибридных мезонов [2].

Для исследования гибридных мезонов с массой до  $2.5 \text{ ГэВ}/c^2$  создан высокоинтенсивный пучок ( $\sim 10^8 \text{ с}^{-1}$ ) линейно поляризованных гамма-квантов с энергией в интервале  $8.4 - 9.2 \text{ ГэВ}$ . Пучок формируется в результате когерентного тормозного излучения электронов с энергией  $12 \text{ ГэВ}$  на ориентированной кристаллической структуре алмазного радиатора [3]. В эксперименте GlueX предполагается впервые измерить зависимость сечения образования экзотических состояний мезонов от энергии поляризованных фотонов. Для выполнения этой задачи необходимо создать детекторы с разрешением  $\Delta E/E < 1 \%$ , измеряющие энергетический спектр пучка поляризованных фотонов. Эту задачу решают две экспериментальные установки: прецизионный годоскоп электронов («микроскоп»), определяющий энергетический спектр пучка фотонов в области энергий  $8.4 - 9.2 \text{ ГэВ}$ , и магнитный спектрометр, работающий в диапазоне энергий гамма-квантов от  $6.00$  до  $12.25 \text{ ГэВ}$ . При этом «микроскоп» электронов позволяет определить энергетический спектр пучка, в котором преобладают неполяризованные гамма-кванты, а магнитный спектрометр определяет энергию поляризованных фотонов, которые выбираются с помощью коллиматора с диаметром окна  $3.4 \text{ мм}$ , расположенного перед магнитным спектрометром на расстоянии  $75$  метров от алмазного радиатора. Коллиматор позволяет убрать неполяризованные фотоны, летящие в более широком телесном угле. Коллимированный пучок, состоящий в основ-

ном из поляризованных фотонов, направляется на мишень экспериментальной установки. Необходимое энергетическое разрешение достигается высокой гранулярностью регистрирующих частей «микроскопа» электронов и магнитного спектрометра, выполненных на основе тонких пластических сцинтилляторов, спектросмещающих волокон и кремниевых фотоумножителей.

Электроны, излучившие фотон в радиаторе, отклоняются дипольным магнитом с полем 1.5 Тл и регистрируются двумя детекторами: годоскопом с высоким разрешением («микроскоп» электронов), состоящим из 80 сцинтилляционных волокон с сечением  $1 \times 1 \text{ мм}^2$ , и широкополосным годоскопом, работающим в диапазоне энергий фотонов от 3.00 до 11.75 ГэВ, что необходимо для юстировки алмазного радиатора. Эти детекторы работают в магнитном поле 0.35 Тл. Загрузка «микроскопа» составляет  $2.5 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{с}$ , поскольку он регистрирует все электроны, создающие поляризованные и неполяризованные фотоны. В этих условиях определение энергии фотона, взаимодействующего в дальнейшем с мишенью экспериментальной установки, требует временного разрешения «микроскопа» не хуже 500 пс.

В магнитном спектрометре энергия гамма-квантов вычисляется по величине отклонения в магнитном поле электронов и позитронов, которые образуются в тонком конвертере, расположенном перед спектрометром. Регистрирующая часть детектора выполнена в виде сцинтилляционного годоскопа, состоящего из 145 пластин толщиной 1 и 2 мм и длиной 10 мм (вдоль пучка), что позволяет измерять спектр пучка поляризованных гамма-квантов в требуемом диапазоне энергий с разрешением  $\Delta E/E < 1 \%$ . Использование конвертера толщиной  $\sim 10^{-4}$  радиационной длины изменяет параметры пучка гамма-квантов не более чем на 0.01 %.

Отличительной особенностью описанных выше детекторов является использование годоскопов из тонких сцинтилляторов (1 – 2 мм) в сочетании с кремниевыми фотоумножителями (SiPM), которые обладают компактными размерами, способны работать в магнитных полях и не требуют высокого напряжения питания. «Микроскоп» электронов и магнитный спектрометр используются в настоящее время для определения энергетического спектра пучка гамма-квантов в эксперименте GlueX и обеспечивают выполнение физической программы.

### **Цель диссертационной работы**

Создание гамма-спектрометрической аппаратуры на основе кремниевых фотоумножителей SiPM для эксперимента GlueX по фоторождению гибридных мезонов с экзотическими квантовыми числами в диапазоне масс 1 – 2.5 ГэВ/ $c^2$ .

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- Экспериментальное доказательство возможности регистрации релятивистской

частицы с эффективностью не хуже 99% в сцинтилляторе толщиной 1 мм и длиной 10 мм (по пучку), являющемся элементом детектора для регистрации энергетического спектра поляризованных гамма-квантов.

- Разработка методики создания многоканальных сцинтилляционных детекторов на основе сцинтилляционных тайлов (пластинчатых сцинтилляторов толщиной 1 мм, спектросмещающих волокон и SiPM).

- Создание спектрометра с энергетическим разрешением  $< 1 \%$  для измерения энергетического спектра гамма-квантов в диапазоне 6 – 12.25 ГэВ с относительным искажением пучка менее 0.01 %.

- Измерение временных характеристик гамма-спектрометра («микроскопа» электронов), работающего в условиях загрузок  $\approx 3 \cdot 10^6$   $e^-/c$  на один канал детектора (для выполнения физической программы эксперимента требуется временное разрешение детектора не хуже 500 пс).

### **Научная новизна работы**

- Впервые на основе тонких пластических сцинтилляторов и кремниевых фотоумножителей создан магнитный гамма-спектрометр для измерения энергетического спектра пучка гамма-квантов в диапазоне 6 ÷ 12 ГэВ с разрешением  $\Delta E/E < 1 \%$  и с изменением интенсивности пучка гамма-квантов менее 0.01 %. Этот прибор в составе экспериментальной установки GlueX позволит впервые измерить зависимость сечения фоторождения гибридных мезонов с экзотическими квантовыми числами от энергии поляризованных гамма-квантов.

- Впервые экспериментально показана неизменность временного разрешения детектора на основе SiPM при загрузках на один канал до  $3 \cdot 10^6$   $e^-/c$ , что позволило создать многоканальный сцинтилляционный детектор, работающий в магнитном поле 0.35 Тл, с временным разрешением  $(300 \pm 10)$  пс в пучке гамма-квантов с интенсивностью  $2.5 \cdot 10^8$   $c^{-1}$ . Допустимые загрузки сцинтилляционных детекторов на базе вакуумных ФЭУ со стандартной схемой питания в существующих экспериментальных установках составляют  $5 \cdot 10^5$  событий/с [4, 5].

### **Достоверность**

Достоверность научных положений и выводов подтверждается совпадением экспериментально измеренного магнитным спектрометром энергетического спектра гамма-квантов с результатом расчетов, проведенных методом Монте-Карло и совпадением результатов измерения эффективности регистрации частиц в сцинтилляционном тайле тремя независимыми способами: с использованием радиоактивного источника, мюонов космических лучей и на ускорителе электронов.

## **Практическая ценность результатов**

Заключается в том, что созданные новые установки («микроскоп» электронов и магнитный спектрометр) используются в эксперименте GlueX по фоторождению гибридных мезонов с экзотическими квантовыми числами в диапазоне масс  $1 - 2.5 \text{ ГэВ}/c^2$ . Эксперимент проводится на ускорительном комплексе CEBAF лаборатории им. Т. Джефферсона и продлится до 2020 года. Детекторы обеспечивают выполнение физической программы эксперимента GlueX.

Разработанная методика может быть использована для создания гамма-спектрометрической аппаратуры в других экспериментах, требующих измерения энергетического спектра пучка гамма-квантов с высокой точностью.

## **Личный вклад соискателя**

Все результаты, представленные в работе, получены либо соискателем лично, либо при его непосредственном участии. Соискатель участвовал в создании экспериментальной установки для тестирования характеристик сцинтилляционных детекторов на базе SiPM, проводил испытания и обрабатывал полученные данные. В результате проведенного исследования соискатель экспериментально измерил характеристики «микроскопа» электронов, работающего при нагрузках до  $2.5 \cdot 10^8$  событий/с и обладающего временным разрешением  $(300 \pm 10)$  пс.

Соискатель разработал и собрал магнитный спектрометр гамма-квантов, разработал программное обеспечение контроля магнитного спектрометра, провел испытания магнитного спектрометра на пучке гамма-квантов, обработал результаты и проанализировал данные этих тестов.

Созданные в ходе работы соискателя детекторы используются в эксперименте GlueX по фоторождению гибридных мезонов с экзотическими квантовыми числами.

## **Основные результаты, представленные к защите**

- Магнитный спектрометр электрон-позитронных пар для измерения энергетического спектра пучка поляризованных гамма-квантов в диапазоне  $6 \div 12.25 \text{ ГэВ}$  с разрешением  $\Delta E/E < 1 \%$  при относительном искажении пучка (изменение интенсивности) менее  $0.01 \%$ .

- Система сцинтилляционных годоскопов, входящих в состав магнитного спектрометра, на основе сцинтилляторов толщиной 1 и 2 мм и длиной 10 мм (вдоль пучка), спектросмещающих волокон и SiPM (сцинтилляционных тайлов), обеспечивающая эффективность регистрации релятивистской частицы выше  $99 \%$ .

- Многоканальный сцинтилляционный детектор («микроскоп» электронов) для определения энергетического спектра пучка гамма-квантов с интенсивностью около

$2.5 \cdot 10^8 \text{ с}^{-1}$  на основе кремниевых фотоумножителей с временным разрешением ( $300 \pm 10$ ) пс, неизменным при загрузках до  $2.5 \cdot 10^8 \text{ е}^-/\text{с}$ .

### **Апробация работы**

Основные результаты и выводы, содержащиеся в диссертации, докладывались на международных конференциях APS (American Physical Society) – 2013 (апрель 2013, Денвер, Колорадо, США), APS DNP (Division of Nuclear Physics) – 2013 (октябрь 2013, Ньюпорт Ньюс, Вирджиния, США), ИСМАРТ – 2014 (октябрь 2014, Минск, Белоруссия) и обсуждались на рабочих совещаниях коллаборации GlueX (2011, 2012, 2013, 2014).

Также основные результаты диссертационной работы изложены в 6 статьях, 5 из которых – в периодических научных изданиях, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, 1 статья в журнале «Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A», индексируемом в международных базах Web of Science и Scopus.

### **Структура и объём диссертационной работы**

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав и заключения. Содержит 125 страниц, включая 90 рисунков, 9 таблиц, 2 приложения и список цитируемой литературы из 85 ссылок.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, приведены основные положения, выносимые на защиту, раскрыты научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** «Эксперимент GlueX в ускорительной лаборатории им. Джефферсона» описывается содержание эксперимента, который в настоящее время готовится в лаборатории им. Джефферсона. В эксперименте GlueX предполагается наблюдать состояние глюонного возбуждения легкого мезона с запрещенными квантовыми числами  $J^{PC} = 1^{-+}$ , что дает информацию об уровне глюонного возбуждения системы  $\bar{q}q$ .

В настоящее время сильные взаимодействия описываются неабелевой калибровочной теорией поля – КХД [6], в которой роль идеальной частицы для ее изучения играют мезоны. Существующие теоретические представления о физике адронов, как правило, следуют из кварковой модели [7]. Кварковая модель описывает физику адронов путем исследования взаимодействия составляющих объектов – валентных кварков, но не описывает состояния с глюонной степенью свободы, которые получи-

ли название экзотических. Гибридные мезоны, состоящие из кварков и «возбужденных» глюонов, находятся в центре внимания эксперимента GlueX.

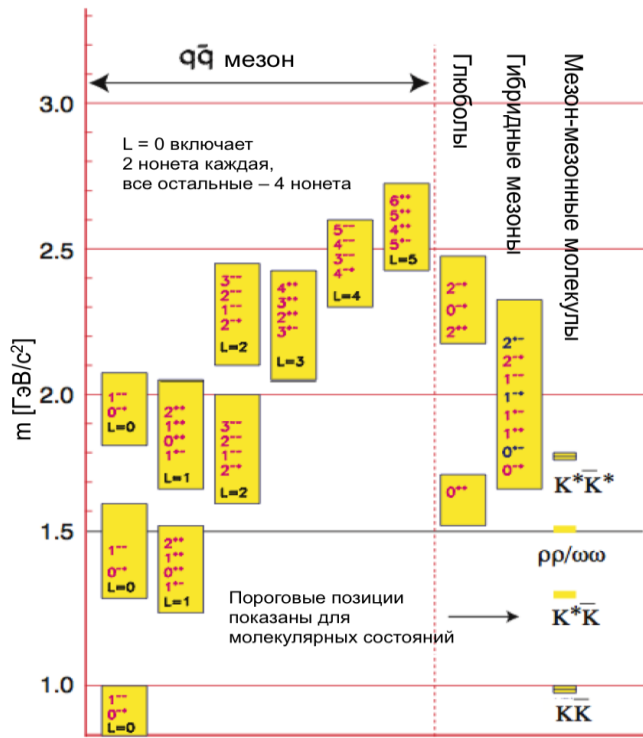


Рис. 1. Схема, показывающая уровень обычных нонетов и ожидаемые массы глюболов, гибридов и молекулярных мезонов в диапазоне масс 1 – 2.5 ГэВ/c<sup>2</sup>

Гибридный мезон в простейшем случае представляет собой  $q\bar{q}$ -пару с дополнительной глюонной степенью свободы. По сравнению с другими экзотическими мезонами обнаружение гибридов гораздо проще, так как, во-первых, они охватывают полный аромат нонетов, и, во-вторых, легчайший гибридный мультиплет  $J^{PC} = \{2^{+-}, 1^{-+}, 0^{+-}, 0^{-+}\}$  содержит, по крайней мере, один гибридный мезон с экзотическими квантовыми числами ( $J^{PC}$ ), запрещенными в обычных состояниях –  $1^{-+}$ . Схема, показывающая уровень обычных нонетов и ожидаемые массы глюболов, гибридов и молекулярных мезонов в диапазоне масс 1 – 2.5 ГэВ/c<sup>2</sup>, изображена на рисунке 1.

Гибридные мезоны в эксперименте GlueX образуются в реакции фоторождения. Адронные свойства фотона способствуют повышению вероятности создания гибридных мезонов [2]. Данных о фоторождении в области энергий рождения экзотических мезонов, исследуемой в эксперименте GlueX, недостаточно [8, 9, 10]. Недостаток данных по фоторождению связан с отсутствием качественных, интенсивных пучков фотонов и подходящей экспериментальной установки.

В эксперименте GlueX предполагается наблюдать состояние  $1^{-+}$  глюонного возбуждения легкого мезона с массами до 2.5 ГэВ/c<sup>2</sup> в реакции  $\gamma p \rightarrow X^+ n$  с последующим его распадом по каналам  $X^+ \rightarrow \rho^* \pi^0 \rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$  и  $X^+ \rightarrow \rho^0 \pi^+ \rightarrow \pi^+ \pi \pi^+$  и в реакции  $\gamma p \rightarrow \eta \pi^0 p$  при энергии линейно поляризованных фотонов около 9 ГэВ. Детектор GlueX регистрирует гамма-кванты в полном телесном угле для наблюдения распадов  $\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma$  и  $\eta \rightarrow \gamma \gamma$ .



Детектор GlueX включает в себя сверхпроводящий соленоид с полем 2.2 Тл, внутри которого установлены мишень, окружающий ее стартовый счетчик, центральная дрейфовая камера (CDC), передняя дрейфовая камера (FDC) и цилиндрический электромагнитный калориметр (BCAL) на основе сцинтилляционных волокон, вмонтированных в свинцовую матрицу [1, 11]. Схема детектора показана на рисунке 2. Пучок фотонов падает на  $\text{LN}_2$  мишень. Стартовый счетчик, выполненный на основе пластиковых сцинтилляторов и SiPM, окружает мишень и дает информацию о начале события. Дрейфовые камеры регистрируют трек вторичных частиц, а два электромагнитных калориметра измеряют энергию вторичных фотонов.

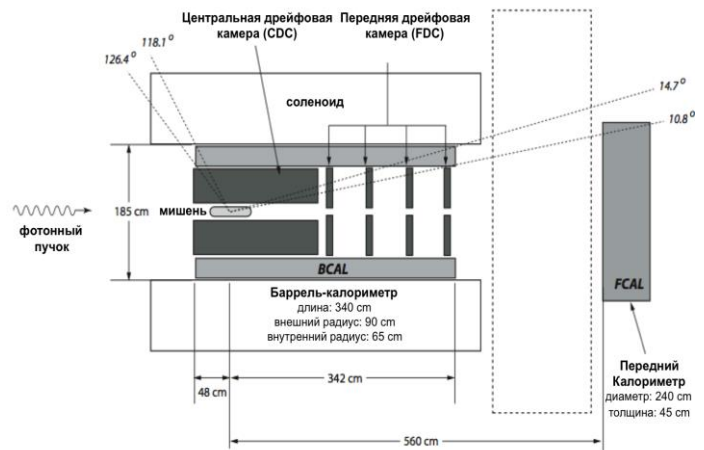


Рис. 2. Детектор GlueX. Детектор имеет цилиндрическую симметрию относительно линии фотонного пучка

Особенностью эксперимента является использование кремниевых фотоумножителей [12] вместо вакуумных фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) (таблица 1). Энергия гамма-квантов в пучке определяется двумя детекторами с использованием SiPM: «микроскопом» электронов и магнитным спектрометром. Также SiPM применяются в стартовом сцинтилляционном счетчике и электромагнитном калориметре, работающими в магнитном поле 2.2 Тл. Всего для оснащения детекторов GlueX используется около 5000 кремниевых фотоумножителей, разработанных компанией Hamamatsu [13].

Таблица 1. Кремниевые фотоумножители SiPM в детекторах эксперимента GlueX.

Детектор	Размер чувствительной площади SiPM, мм <sup>2</sup>	Количество
Электромагнитный калориметр	12×12	3840
Стартовый счетчик	3×3	120
Магнитный спектрометр	3×3	290
«Микроскоп» электронов	3×3	500

Во второй главе «Детекторы фотонного пучка эксперимента GlueX» описано получение фотонного пучка и детекторы его контроля. Заключительная часть главы посвящена исследованию критических для эксперимента характеристик «микроскопа» электронов, выполненного на базе кремниевых фотоумножителей. Это возмож-

ность работы в условиях загрузок до  $2.5 \cdot 10^8$   $e^-/c$  с временным разрешением лучше 500 пс.

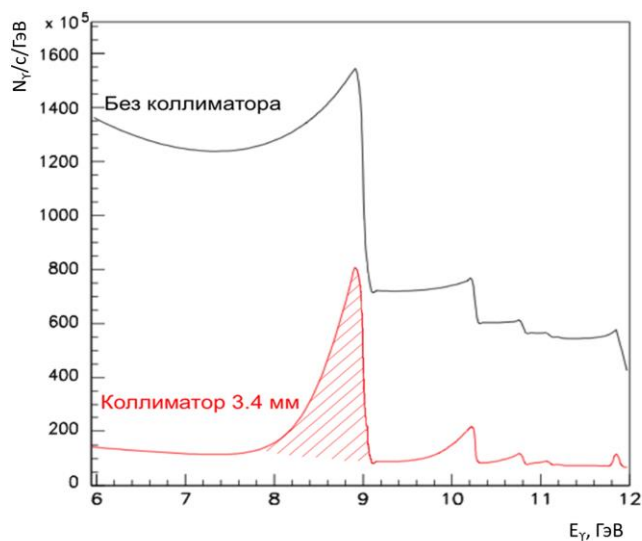


Рис. 3. Энергетический спектр фотонов до и после коллиматора от ориентированного алмазного радиатора толщиной 20 мкм и пучка электронов

Монохроматический пучок электронов с энергией 12 ГэВ обеспечивает эксперимент GlueX высокоинтенсивным пучком гамма-квантов ( $\sim 10^8$   $c^{-1}$ ) с энергетическим спектром, в котором преобладают линейно поляризованные фотоны в области 8.4 – 9.2 ГэВ (рисунок 3). Фотонный пучок формируется в результате когерентного тормозного излучения электронов с энергией 12 ГэВ на ориентированной кристаллической структуре алмазного радиатора толщиной 20 мкм ( $\approx 10^{-3} X_0$ ) [3, 11].

На рисунке 4 показана схема формирования фотонного пучка и детекторы его контроля. Спектрометр «меченых» фотонов состоит из «микроскопа» электронов, измеряющего энергию рассеянных электронов, соответствующую диапазону энергий 8.4 – 9.2 ГэВ пучка гамма-квантов, и широкополосного годоскопа, использующегося для юстировки алмазного радиатора (энергия фотонов в диапазоне 3.00 – 11.75 ГэВ). При этом «микроскоп» регистрирует все электроны, создающие поляризованные и неполяризованные фотоны.

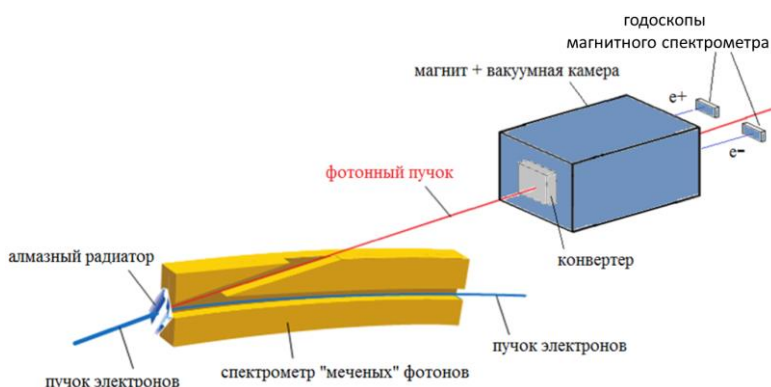


Рис. 4. Схема формирования и детекторы фотонного пучка

Для определения энергетического спектра поляризованных гамма-квантов используется магнитный спектрометр, расположенный после коллиматора с диаметром отверстия 3.4 мм, позволяющим отсекал неполяризованные фотоны, летящие в более широком телесном угле.

Регистрирующая часть «микроскопа» электронов состоит из 80 сцинтилляционных волокон с сечением  $1 \times 1$  мм<sup>2</sup>, как показано на рисунке 5. Благодаря такой кон-

струкции, детектор позволяет определять энергию фотонов в диапазоне 8.4 – 9.2 ГэВ с разрешением  $\sim 0.1\%$ . Загрузка «микроскопа» составляет  $2.5 \cdot 10^8$  событий/с, поскольку он регистрирует все электроны, создающие как поляризованные, так и неполяризованные гамма-кванты. В этих условиях соответствие фотона, провзаимодействовавшего в мишени экспериментальной установки, фотону, энергия которого измерена в «микроскопе», требует временного разрешения микроскопа менее 500 пс.

Исходя из представленных выше условий, сформулированы основные требования к временным характеристикам «микроскопа» электронов:

- временное разрешение лучше 500 пс для однозначной привязки событий к структуре ускорителя (банч каждые 2 нс с длительностью 500 пс);
- неизменность временного разрешения при загрузках до  $3 \cdot 10^6$  событий/с на один канал детектора для работы с пучком гамма-квантов интенсивностью около  $10^8 \text{ с}^{-1}$  [11].

Для исследования временных характеристик детекторов на основе кремниевых фотоумножителей разработана экспериментальная установка на основе светодиода с пиковой длиной волны 470 нм и двух идентичных SiPM, расположенных на одинаковом расстоянии от источника света. Такая конфигурация экспериментальной установки выбрана для уменьшения влияния нестабильности светодиода и систематических эффектов электроники. Импульс с генератора (HP 8116) использовался для формирования световой вспышки светодиода, а также для синхронизации считывания данных с установки. Импульс длительностью 8 нс имитирует сигнал от «быстрого» сцинтиллятора. Сигналы с SiPM усиливались с помощью широкополосных усилителей с коэффициентом усиления 30, разработанных в лаборатории им. Джефферсона, и посылались на 12-битный параллельный АЦП (fADC-250) и 25-пикосекундный ВЦП (Caen VX 1290).

Временное разрешение ( $\sigma_\tau$ ) оценивалось по распределению разниц времен прихода сигналов первого и второго SiPM ( $\sigma_{(t_1-t_2)}$ ), как:

$$\sigma_\tau = \frac{\sigma_{(t_1-t_2)}}{\sqrt{2}}. \quad (1)$$

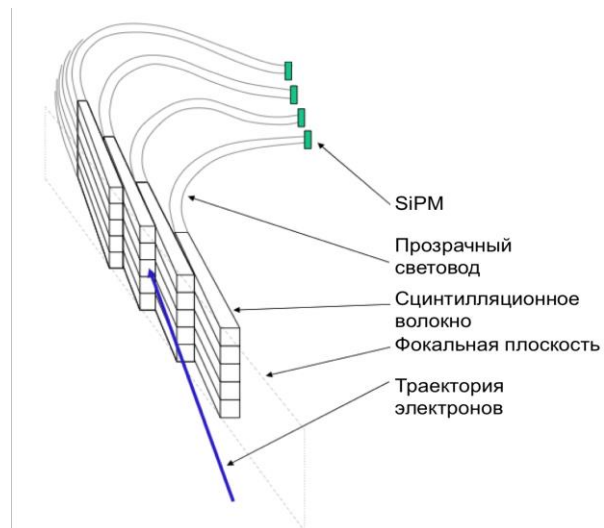


Рис. 5. Фрагмент регистрирующей части «микроскопа» электронов

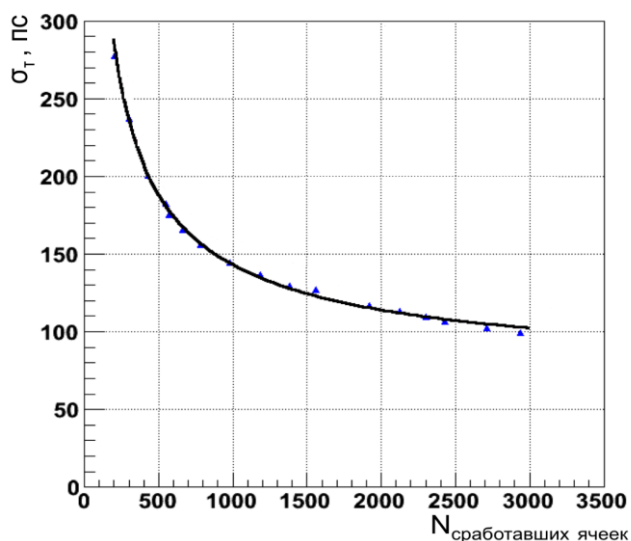


Рис. 6. Зависимость временного разрешения SiPM от количества сработавших ячеек

видно из рисунка 6, временное разрешение SiPM при 200 сработавших пикселях (расчётном количестве регистрируемого света) не хуже 300 пикосекунд, что позволяет однозначную привязку фотонов, регистрируемых в «микроскопе» по рассеянным электронам, к банчу ускорителя и, следовательно, к фотонам, взаимодействующим в мишени.

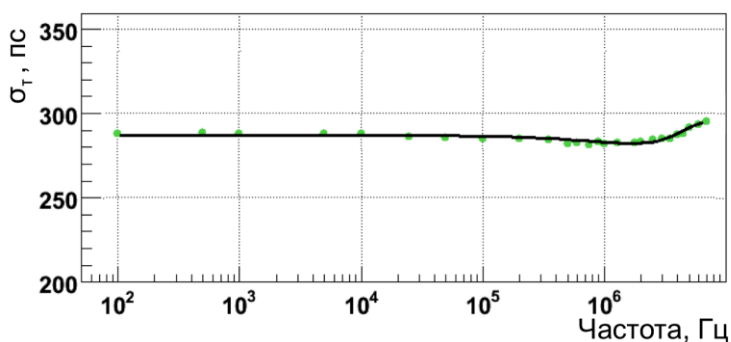


Рис. 7. Зависимость временного разрешения SiPM от частоты сигнала при 200 сработавших ячейках SiPM

Временные разрешения для SiPM с размером чувствительной области  $3 \times 3 \text{ мм}^2$  и ячейкой  $50 \times 50 \text{ мкм}^2$  (Hamamatsu S10931-050P [13]) в зависимости от количества сработавших ячеек ( $\approx$  фотоэлектронов) показаны на рисунке 6. Данная зависимость аппроксимировалась с помощью следующей функции:

$$\sigma_{\tau} = \sqrt{\frac{\sigma_s^2}{N_{\text{ячеек}}} + \sigma_e^2}, \quad (2)$$

где  $N_{\text{ячеек}}$  – количество сработавших ячеек SiPM,  $\sigma_s$  и  $\sigma_e$  – два параметра аппроксимирующей функции. Первый связан со статистикой фотоэлектронов, второй определяется электроникой. Как

Зависимость временного разрешения от частоты сигнала LED показана на рисунке 7. Видно, что временное разрешение «микроскопа» электронов, выполненного на основе SiPM, неизменно до нагрузок около  $3 \cdot 10^6$  событий/с при ожидаемом количестве света на уровне 200 фотоэлектронов.

Следует отметить, что «микроскоп» электронов работает в условиях радиационного фона экспериментального зала. В ходе работы проведены исследования радиационной стойкости кремниевых фотоумножителей, наиболее подвергаемых радиационному поражению элементов детектора. Наиболее серьезное поражение кремниевым фотоумножителям прино-

сят нейтроны из-за перемещения первично выбитого атома (ПВА) из своего узла решетки [14].

Для исследования радиационной стойкости детектор на основе кремниевых фотоумножителей облучался на пучке электронов. Регистрация дозы, полученной фотоумножителями, осуществлялась рядом дозиметров, расположенных на различном расстоянии от пучка. Доза нейтронного излучения, получаемая фотоумножителями «микроскопа» в условиях радиационного фона экспериментального зала с учетом защиты на основе борированного полиэтилена, составляет  $\approx 40 \text{ н}_{\text{экв}}/\text{см}^2\text{с}$ . Темновой счет 50 кремниевых фотоумножителей до облучения составляет 0.8 – 1.0 МГц. Величина темнового счета каждого из 50 SiPM после тестов на пучке электронов ускорителя показана на рисунке 8. Значения нейтронного фона экспериментального зала, план эксперимента и полученные экспериментально значения максимальной дозы нейтронного излучения ( $9,72 \cdot 10^7 \text{ н}_{\text{экв}}/\text{см}^2$ ) позволяют рассчитать, что за 5 лет (время набора статистики GlueX) темновой ток кремниевых фотоумножителей возрастет в 5 раз. Такое возрастание темнового счета не повлияет на характеристики «микроскопа» электронов.

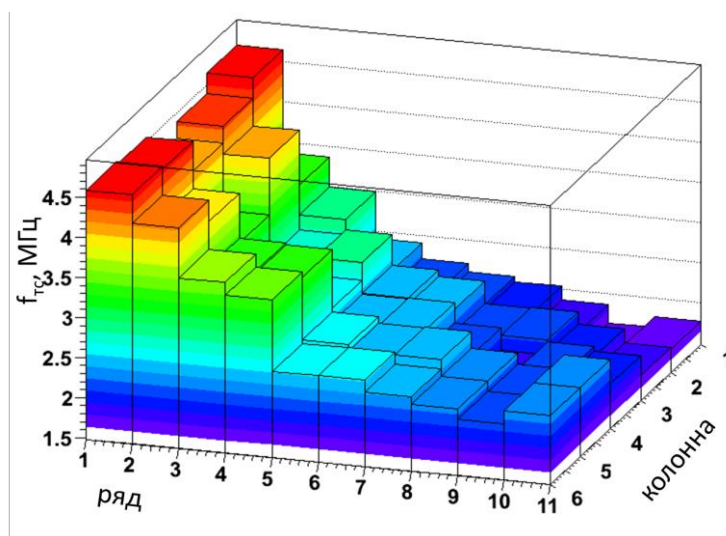


Рис. 8. Темновой счет 50 кремниевых фотоумножителей (каждый столбец на рисунке соответствует одному SiPM) после тестов на пучке электронов ускорителя

Результаты исследования квантовой эффективности кремниевых фотоумножителей проведенного до и после облучения показали разницу между значениями менее 0.1 %. В ходе исследования показана работоспособность «микроскопа» электронов в условиях экспериментального зала в течение всего времени необходимого для набора достаточного количества статистики эксперимента.

**В третьей главе** «Магнитный гамма-спектрометр» описан детектор и этапы его разработки. Показан принцип работы магнитного спектрометра, целесообразность использования тонких сцинтилляционных пластин и SiPM в качестве регистрирующей части детектора, представлены результаты проведенного моделирования элементов магнитного спектрометра, которые позволили выбрать конвертор, поле дипольного магнита и геометрию самого детектора. Приведены результаты исследования све-

тосбора со сцинтилляционного тайла с помощью лабораторного источника излучения, мюонов космических лучей и на пучке электронов лаборатории им. Джефферсона. Описана разработка электроники и программного обеспечения детектора, сборка и установка детектора в экспериментальный зал. Результаты испытания спектрометра в составе экспериментальной установки GlueX на пучке гамма-квантов завершают третью главу.

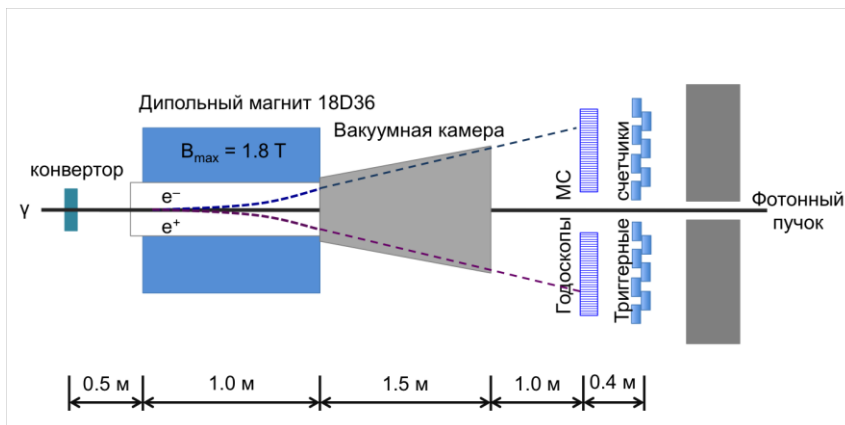


Рис. 9. Схема расположения элементов магнитного спектрометра

Для точного определения энергии фотонного пучка используется процесс рождения электрон-позитронной пары. Энергия фотонов рассчитывается по величине отклонения электронов и позитронов, регистрируемых системой годоскопов, в магнитном поле (магнитном

спектрометре). Основной задачей магнитного спектрометра является измерение энергетического спектра пучка гамма-квантов в интервале 6.00 – 12.25 ГэВ практически без влияния на параметры пучка (интенсивность пучка, энергетическое и угловое распределение гамма-квантов в пучке). Определение энергии одного и того же фотона в «микроскопе» электронов и магнитном спектрометре позволяет калибровать «микроскоп», который в дальнейшем используется для измерения энергии фотонов, взаимодействующих в мишени.

Схема расположения элементов магнитного спектрометра показана на рисунке 9. Фотон образует электрон-позитронную пару в конверторе, расположенном в пучке фотонов перед дипольным магнитом. Толщина конвертора при которой относительное искажение пучка (изменение интенсивности) менее 0.01 % составляет  $10^{-4} X_0$ . Для увеличения статистики магнитного спектрометра также предусмотрена возможность использования конвертеров толщиной  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $10^{-3} X_0$ . Дипольный магнит 18D36 с однородным полем выбран в целях минимизации неопределенностей в расчетах траектории электронов и позитронов. Отклоняясь в магнитном поле, электроны и позитроны с энергией в интервале от 3.00 до 6.25 ГэВ проходят через тонкое (100 мкм) выходное окно вакуумной камеры и регистрируются двумя типами сцинтилляционных детекторов: годоскопами магнитного спектрометра (МС), предназначенным для

измерения энергетического спектра гамма-квантов, и сцинтилляционными счетчиками (МСНР), являющимися элементами триггера спектрометра.

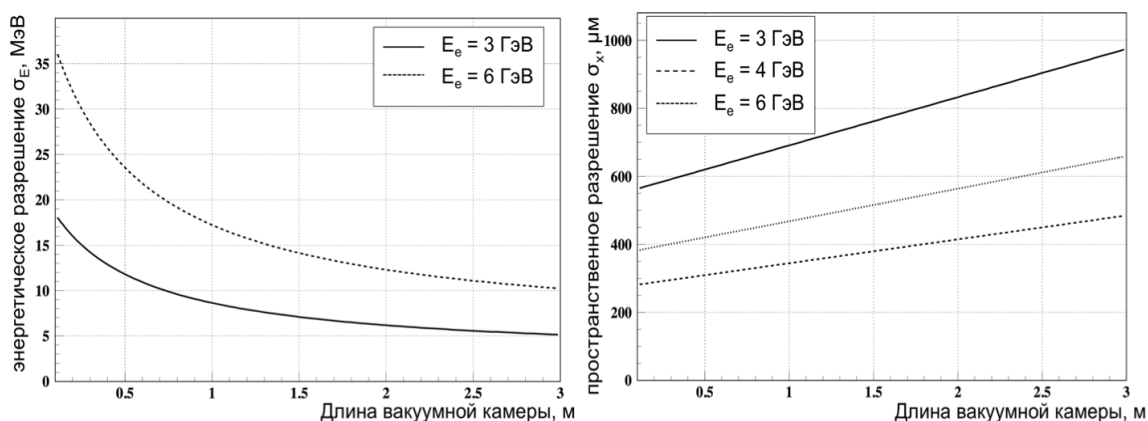


Рис. 10. Энергетическое (а) и пространственное разрешение (б) в зависимости от длины вакуумной камеры

В ходе работы над магнитным спектрометром проведено моделирование параметров элементов детектора. На рисунке 10 показано энергетическое (а) и пространственное разрешение (б) магнитного спектрометра в зависимости от длины вакуумной камеры. В экспериментальном зале для детектора выделено около 5.4 м, в которые должны быть вписаны магнит с известной длиной, вакуумная камера, два сцинтилляционных детектора и остаться место для технического обслуживания. Длина вакуумной камеры в 1.5 м выбрана с целью оптимизации энергетического разрешения и сегментации детектора. При длине вакуумной камеры 1.5 м (с учетом расстояния от вакуумной камеры до годоскопов магнитного спектрометра общая длина составляет 2.5 м) для детектирования гамма-квантов в диапазоне энергий от 3 до 6.25 ГэВ ширина детектора должна составлять около 250 мм. Использование двух видов тайлов толщиной 1 и 2 мм выполнено для сокращения числа каналов электроники и для обеспечения высокого разрешения во всем диапазоне энергий. Также моделирование показало, что суммарный вклад в энергетическое разрешение от процесса многократного рассеяния в конверторе, размера пятна фотонного пучка и асимметрии образования  $e^\pm$ -пары значительно меньше вклада в разрешение, вызванного угловым разбросом электронов и позитронов в процессе фоторождения.

Максимальный угол отклонения электронов (позитронов) от линии пучка равен:  $\theta(6.25 \text{ ГэВ}) \div \theta(3 \text{ ГэВ}) = 4.83^\circ$ , поэтому для уменьшения неоднородности в определении энергии фотона необходимо скорректировать позицию каждого сцинтилляционного тайла, так чтобы траектория электрона (позитрона) была перпендикулярна торцу сцинтилляционной пластины. Это достигается добавлением через каждые 10 мм небольшой прослойки толщиной 50 мкм между сцинтилляторами.

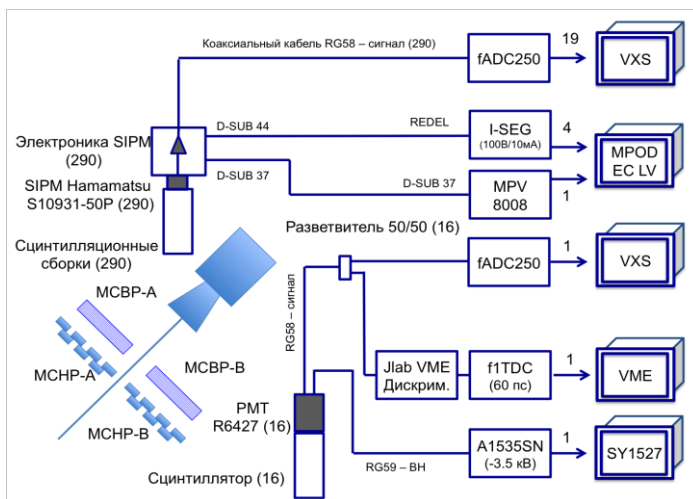


Рис. 11. Системная диаграмма эксперимента: считывающая электроника магнитного спектрометра

Системная диаграмма группы детекторов магнитного спектрометра, разработанная в ходе выполнения диссертационной работы, представлена на рисунке 11. Оцифровка амплитудных сигналов магнитного спектрометра и счетчиков низкого разрешения осуществляется 20 модулями fADC-250 (19 модулей на МС и 1 на МСНР). При этом для осуществления временных измерений сигнал со счетчиков МСНР разветвляется в отношении 1/1 и одновременно по-

ступает на модуль TDC-F1. Амплитуда сигнала, получаемого с выхода SiPM при регистрации релятивистского электрона, недостаточна для последующей обработки. Поэтому сигнал с каждого SiPM подается на предусилитель, разработанный в лаборатории им. Джефферсона специально для данного типа кремниевых фотоумножителей. С целью уменьшения числа каналов электроники SiPM отбираются по группам с максимальной разницей напряжения питания 0.01 В, и уже в каждой группе происходит индивидуальная подстройка  $U_{см}$  с помощью резистора. Таким образом, один канал питания обеспечивает работу 5-ти SiPM. Питание магнитного спектрометра высокого разрешения осуществляется двумя типами модулей:

- wiener OMPV 8008 для низкого напряжения питания (5 В) предусилителей;
- I-SEG EHSF 201 для напряжения смещения кремниевых фотоумножителей (максимальное значение 120 В).

Система контроля детектора включает в себя аппаратную конфигурацию параметров, оперативный мониторинг и систему сигнализации при критических ситуациях.

Контроль всех параметров выполнен на единой платформе (на базе переменных EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System) [15]) для всех подсистем GlueX. Система сигнализации и обмена сообщениями позволяет сообщить свое состояние программе мониторинга и операторам в ходе эксперимента. Сбор данных и база данных выполнены единообразно для увеличения быстродействия и согласования всех систем детектора GlueX. Главными задачами программного обеспечения мониторинга магнитного спектрометра являются:



- включение/выключение каналов и групп каналов, изменение значений напряжения питания и постоянный мониторинг,
- сигнализация о проблемах и некорректно работающем оборудовании,
- архивирование и возможность восстановления параметров детектора.

Для реализации поставленных выше задач разработан пользовательский интерфейс на основе графического интерфейса CSS (Control System Studio) и Python-скриптов. Вид главного меню клиентского интерфейса показан на рисунке 12. Он представляет собой два независимых друг от друга блока для управления низким напряжением питания предусилителей и напряжением смещения кремниевых фотоумножителей. Блоки управления состоят из ряда функциональных модулей. Блоки All LV/A/B позволяют включать/выключать и выставлять параметры (напряжение питания, скорость набора и сброса, критические значения тока и т. п.) на все модули вместе и на отдельные блоки для управления каждым каналом независимо от других. При включении модуля меняется цвет блока с красного на зеленый, красный цвет также сигнализирует о возникших проблемах в работе. При нажатии на знак блока всплывает меню, которое позволяет выставлять параметры питания. Мониторинг параметров организован двумя гистограммами – считываемое напряжение питания и ток, в зависимости от группы.

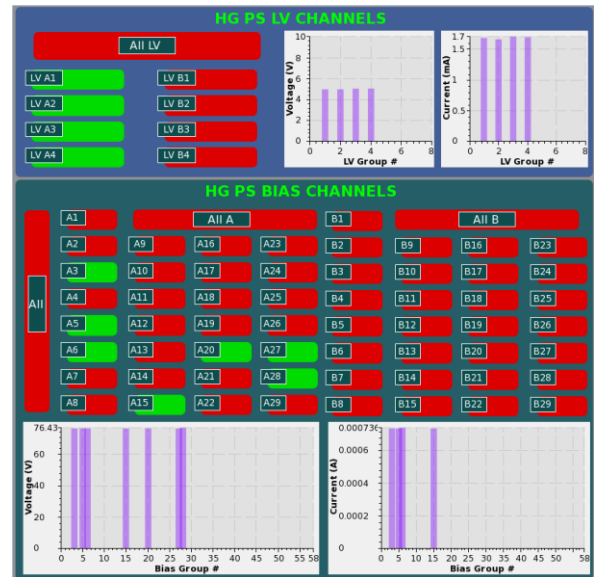


Рис. 12. Вид главного меню интерфейса системы контроля и мониторинга напряжения питания магнитного спектрометра

Годоскоп магнитного спектрометра представляет собой горизонтально стоящую стопку сцинтилляционных пластин размерами  $30 \times 10 \times 1$  мм<sup>3</sup> и  $30 \times 10 \times 2$  мм<sup>3</sup>. К торцу пластин приклеено спектросмещающее волокно. Каждое плечо детектора состоит из 40 одномиллиметровых и 105 двухмиллиметровых каналов, которые перекрывают весь диапазон энергий фотонов. Регистрация света в каждом канале осуществляется кремниевыми фотоумножителями SiPM Hamamatsu с чувствительной площадью  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>.

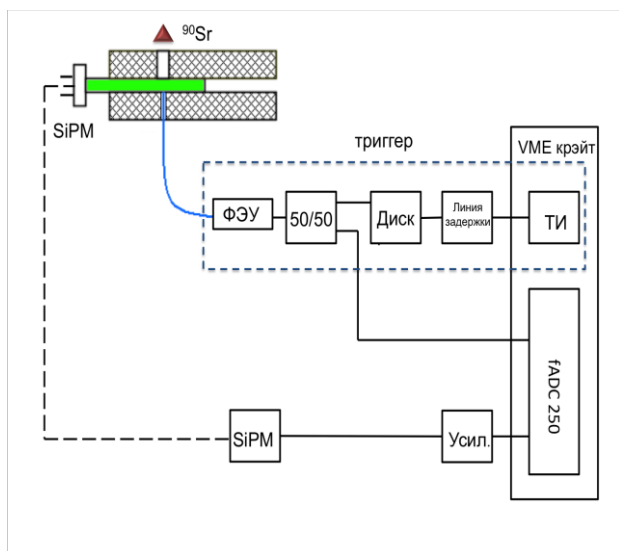


Рис. 13. Схема экспериментальной установки для исследования светосбора с тайлов с использованием радиоактивного источника излучения  $^{90}\text{Sr}(\text{Y})$

трона по длине сцинтиллятора (10 мм).

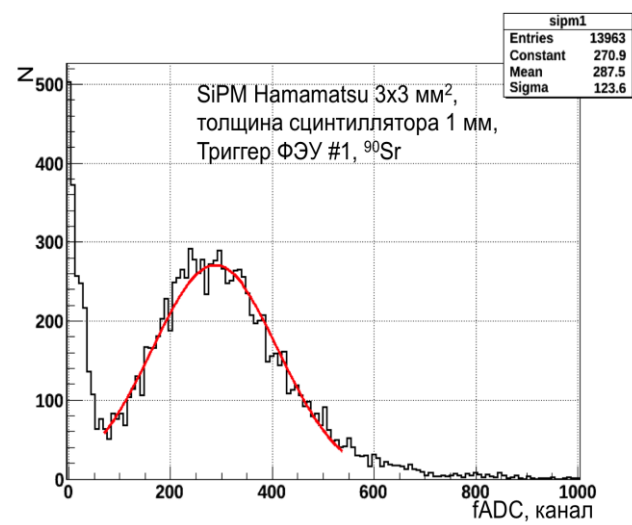


Рис. 14. Спектр от источника  $^{90}\text{Sr}$

Электронны от источника излучения  $^{90}\text{Sr}(\text{Y})$  имеют сплошной энергетический спектр в диапазоне от 0 до 2.26 МэВ, из которого регулировкой порога дискриминатора выбираются сигналы от электронов с энергией свыше 1.5 МэВ (минимальная ионизирующая способность электрона). Это позволяет отобрать электроны с одинаковым энерговыделением, что необходимо для дальнейшего сопоставления результатов. Спектросмещающее волокно приклеено к торцу сцинтиллятора и выведено на SiPM (Hamama-

Для определения возможности регистрации света в тонком сцинтилляторе проведены ряд тестов: с лабораторным источником излучения, мюонами космических лучей и на пучке электронов. В лабораторных условиях с радиоактивным источником излучения частица проходит перпендикулярно поверхности сцинтилляционного тайла (1 или 2 мм пластического сцинтиллятора). Такая конфигурация экспериментальной установки позволяет без использования пучка электронов определить возможность регистрации электронов в сцинтилляционном тайле магнитного спектрометра и оценить количество регистрируемого света в случае пролета элект-

Установка для исследования светосбора показана на рисунке 13. Сцинтилляционный тайл расположен между двумя алюминиевыми пластинами с двумя соосными отверстиями. Отверстие в верхней пластине служит коллиматором для электронов от источника  $^{90}\text{Sr}(\text{Y})$ . В отверстие нижней пластины вставлено сцинтилляционное волокно, свет от которого регистрируется вакуумным фотомножителем (ФЭУ). Сигнал с ФЭУ через дискриминатор поступает на «ворота» АЦП (fADC-250) и далее используется для отбора релятивистской частицы.

tsu) с чувствительной областью  $3 \times 3 \text{ мм}^2$ . Характерный спектр кремниевого фотоумножителя от источника  $^{90}\text{Sr}$  представлен на рисунке 14. Исходя из полученных спектров и калибровок SiPM, оценено количество фотоэлектронов для различных вариантов сцинтилляционных тайлов:

- $N_{\text{ф.эл.}} = 5.5 \pm 1.5$  для сцинтилляционного тайла  $30 \times 10 \times 1 \text{ мм}^3$ ,
- $N_{\text{ф.эл.}} = 11 \pm 2$  для сцинтилляционного тайла  $30 \times 10 \times 2 \text{ мм}^3$ .

С целью проверки полученных результатов, проведен аналогичный эксперимент с использованием космических мюонов с энергией больше 250 МэВ. В этом случае исследуемый сцинтиллятор помещался между двумя свинцовыми пластинами толщиной 150 мм. Результаты этого исследования полностью согласуются с полученными ранее результатами и свидетельствуют о возможности использования тонких сцинтилляторов (1 мм) и SiPM для построения магнитного спектрометра, так как сигнал детектора регистрируется с эффективностью свыше 99 % и отделяется от однофотонных шумов SiPM.

Для оценки светосбора реального детектора при прохождении электрона вдоль сцинтилляционного тайла собран и испытан на пучке электронов ускорителя лаборатории им. Джефферсона прототип магнитного спектрометра. Детектор установлен перпендикулярно пучку электронов с энергией 0.54 ГэВ в экспериментальном зале лаборатории Джефферсона. Прототип представляет собой уменьшенную копию детектора и состоит из 12-ти тайлов толщиной 1 мм и 3-х тайлов толщиной 2 мм. При этом электрон, в отличие от предыдущих тестов, проходит по длине (10 мм) сцинтилляционного тайла.

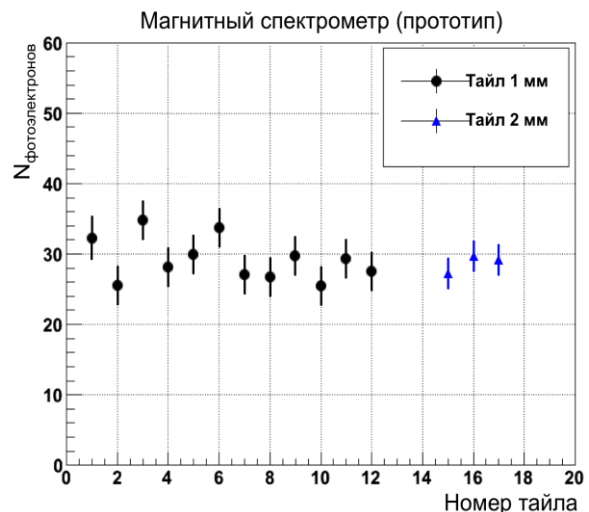


Рис. 15. Количество фотоэлектронов для каждого сцинтилляционного тайла, полученное на пучке электронов

Результаты тестов на пучке ускорителя электронов для одномиллиметровых и двухмиллиметровых тайлов представлены на рисунке 15. Среднее количество фотоэлектронов  $N_{\text{ф.эл.}} = 29 \pm 3$  для сцинтилляторов толщиной 1 мм и 2 мм. Увеличение толщины сцинтиллятора с 1 до 2 мм при прохождении частицы вдоль тайла практически не изменяет числа зарегистрированных электронов. Для увеличения светосбора и отказоустойчивости детектора в окончательный вариант магнитного спектрометра добавлено второе спектросмещающее волокно (ССВ) с противоположного торца сцинтиллятора, что увеличивает светосбор с детектора приблизительно в 2 раза.

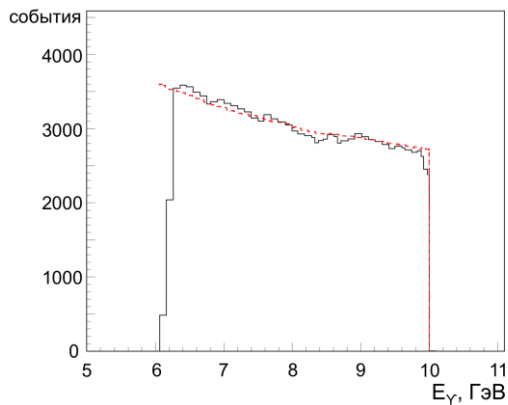


Рис. 16. Спектр энергии пучка фотонов, полученный магнитным спектрометром (сплошная линия), и расчетный спектр (пунктир)

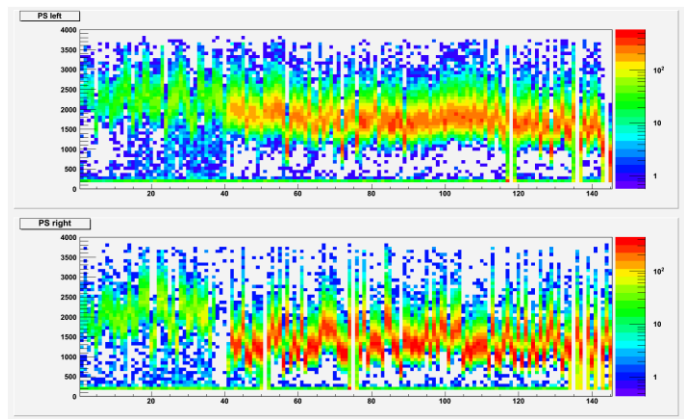


Рис. 17. Распределение амплитуды сигналов для каждого из 290 каналов магнитного спектрометра

Первый фотонный пучок доставлен в экспериментальный зал GlueX в ноябре 2014 года. Электронный пучок ускорителя с энергией 10 ГэВ за счет тормозного излучения в алюминиевом радиаторе (в дальнейшем будет заменен на алмазный радиатор) толщиной  $2 \cdot 10^{-3} X_0$  создает фотонный пучок. Спектр энергии фотонов, показанный на рисунке 16, определялся по двум плечам магнитного спектрометра при совпадении электронного и позитронного события. Он соответствует расчётному спектру фотонов. На рисунке 17 приведено распределение амплитуды сигналов для всех 290-та каналов магнитного спектрометра. С учетом проведенных калибровок магнитного спектрометра и измеренных амплитуд каждого канала рассчитано среднее количество фотоэлектронов, составляющее  $N_{\text{ф.эл.}} = 75 \pm 9$  ф. эл. Результат свидетельствует о высокой эффективности ( $\sim 100\%$ ) регистрации электронов при выставлении порога дискриминации на уровне шумов кремниевых фотоумножителей (3 – 5 ф.эл.).

В **Заключении** сформулированы основные выводы.

Диссертационная работа посвящена разработке детекторов гамма-квантов для эксперимента GlueX, в котором предполагается наблюдение гибридного мезона с запрещенными квантовыми числами с массой до  $2.5 \text{ ГэВ}/c^2$ . Основные результаты диссертационной работы можно сформулировать следующим образом:

1. Создан магнитный спектрометр электрон-позитронных пар, в котором впервые используются SiPM и тонкие сцинтилляционные пластины (1 – 2 мм). Спектрометр предназначен для измерения энергетического спектра гамма-квантов в диапазоне 6.00 – 12.25 ГэВ с относительным искажением (изменение интенсивности) пучка гамма-квантов, используемого в эксперименте, менее 0.01 %. Проведенные испытания магнитного спектрометра в составе экспериментальной установки GlueX свидетельствуют о высокой эффективности регистрации электрон-позитронных пар во всех

290 каналах. Измеренный спектр пучка гамма-квантов соответствует расчетному. Применение спектрометра позволит впервые измерить зависимость сечения фоторождения экзотических мезонов от энергии гамма-квантов.

2. В единой методике показана эффективность свыше 99 % при регистрации релятивистской частицы в годоскопах на основе пластических сцинтилляторов толщиной 1 мм (10 мм вдоль пучка) и кремниевых фотоумножителей, являющихся элементами регистрирующей части магнитного спектрометра гамма-квантов.

3. Разработанный многоканальный «микроскоп» электронов работает в условиях загрузки  $2.5 \cdot 10^8 \text{ e}^-/\text{с}$  с временным разрешением  $300 \pm 10 \text{ пс}$ , что позволяет однозначно соотнести фотон, взаимодействующий в мишени экспериментальной установки, с фотоном, энергия которого измерена в «микроскопе». Проведенные измерения радиационной стойкости детектора показывают, что радиационное поражение «микроскопа» электронов за время набора необходимой статистики GlueX не влияет на работу детектора.

В единой методике с использованием SiPM создана гамма-спектрометрическая аппаратура экспериментальной установки GlueX, обладающая высоким энергетическим ( $\Delta E/E < 1 \%$ ) и временным разрешением  $300 \pm 10 \text{ пс}$ . Результаты проделанной работы свидетельствуют о соответствии детекторов гамма-квантов физической программе эксперимента.

### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Бужан П.Ж., Брантова Т.С., Канцеров В.А., Комиссаров П.В., Окальева Н.М., Толстухин И.А. Автоматизированная система для тестирования твердотельных кремниевых фотоумножителей // Ядерная физика и инжиниринг. 2010. Том 1. № 5. С. 450-456.
2. Канцеров В.А., Сомов А.С., Сомов С.В., Толстухин И.А. Исследование временных характеристик твердотельных кремниевых фотоумножителей // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Т. 4. № 2. - С. 146-155.
3. Канцеров В.А., Сомов А.С., Сомов С.В., Толстухин И.А. Применение кремниевых фотоумножителей для регистрации релятивистских частиц в тонких сцинтилляторах // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Том 4. № 7. С. 609-612.
4. Сомов А.С., Сомов С.В., Толстухин И.А. Применение кремниевых фотоумножителей для создания спектрометра гамма-квантов в эксперименте по фоторождению экзотических мезонов // Ядерная физика и инжиниринг. 2013. Том 4. № 7. С. 613-619.
5. I. Tolstukhin, A. Somov, S. Somov, A. Bolozdynya. Recording of relativistic particles in thin scintillators // Instruments and Experimental Techniques. 2014. Vol. 57. No 6. p. 658-661. doi:10.1134/S0020441214060153.

6. F. Barbosa, C. Hutton, A. Sitnikov, A. Somov, S. Somov, I. Tolstukhin. Pair spectrometer hodoscope for Hall D at Jefferson Lab // Nucl. Instr. And Meth. A. 2015. V. 795. p. 376–380. doi:10.1016/j.nima.2015.06.012.

### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. The GlueX Collaboration, интернет ресурс <https://gluex.org>
2. A. Afanasev and P. Page, Photoproduction and Electroproduction of  $J^{PC} = 1^{-+}$  exotics // Phys. Rev. D. 1998. V. 57. p. 6771 – 6777.
3. W. Kaune, G. Miller, W. Oliver, R. W. Williams and K. K. Young, Inclusive Cross-Sections for Pion and Proton Production by Photons Using Collimated Coherent Bremsstrahlung // Phys. Rev. D. 1975. V. 11. p. 478-494.
4. B. Loher, D. Savran, E. Fiori, M. Miklavc, N. Pietralla, M. Vencelj, High count rate  $\gamma$ -ray spectroscopy with LaBr<sub>3</sub>:Ce scintillation detectors // Nucl. Instr. And Meth. A. 2012. V. 686. p. 1-6.
5. L. Stevanato et. al., High rate read-out of LaBr(Ce) scintillator with a fast digitizer // Nucl. Instr. And Meth. A. 2012. V. 678. p. 83-87.
6. S. Weinberg, Non-Abelian Gauge Theories of the Strong Interactions // Phys. Rev. Lett. 1973. V. 31. p. 494-497.
7. M. Gell-Mann, Schematic model of baryons and mesons // Phys. Lett. 1964. V. 8. p. 214-215.
8. J. Ballam, G. Chadwick, Y. Eisenberg, E. Kogan, K. Moffeit, et al., Vector Meson Production by Polarized Photons at 2.8 GeV, 4.7-GeV and 9.3 GeV // Phys. Rev. D. 1973. V. 7. p. 3150-3177.
9. SLAC Hybrid Facility Photon Collaboration, K. Abe et al., Study of the  $\rho'(1600)$  mass region using  $\gamma p \rightarrow \pi^+ \pi^- p$  at 20 GeV // Phys. Rev. Lett. 1984. V. 53. p. 751-754.
10. J. Ballam, G. Chadwick, M. Menke, P. Seyboth, Y. Eisenberg, et al., Study of high-energy photoproduction with positron annihilation radiation: I three prong events // Phys. Rev. D. 1972. V. 5. p. 15-38.
11. JLab Experiment E12-06-102, интернет-ресурс: [http://www.jlab.org/exp\\_prog/proposals/06/PR12-06-102.pdf](http://www.jlab.org/exp_prog/proposals/06/PR12-06-102.pdf), 2006.
12. P. Buzhan, B. Dolgoshein et al., Silicon photomultiplier and its possible applications // Nucl. Instr. And Meth. A. 2003. V. 504. p. 48 – 52.
13. Интернет-ресурс <http://www.hamamatsu.com>
14. G. Lindstrom, Radiation damage in silicon detectors // Nucl. Instrum. Meth. A. 2003. V. 512. p. 30–43
15. Интернет-ресурс <http://www.aps.anl.gov/epics>